

© О.Ю. БОЛДЫРЕВА¹, Л.Н. СОКОЛЮК², Л.Н. ФИЛИМОНОВА³

^{1,2,3} Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН (Тюменский филиал)

³Тюменский государственный университет
olga.boldyreva@mail.ru, orlubov@mail.ru, filimonovaln@mail.ru

УДК 532.546, 622.276

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБМЕНА ЖИДКОСТЬЮ
МЕЖДУ СЛОЯМИ РАЗНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕФТЯНОЙ ПЛАСТ**

**INTENSITY INVESTIGATION OF FLUID EXCHANGE
BETWEEN THE LAYERS OF DIFFERENT PERMEABILITY
AT CYCLIC IMPACT ON OIL RESERVOIR**

АННОТАЦИЯ. Циклическое воздействие на нефтяной пласт исследовалось с середины 1960-х годов. При закачке воды в пласт давление в высокопроницаемых зонах изменяется быстрее, чем в низкопроницаемых, поэтому между этими зонами возникают перепады давления, вызывающие перетоки флюидов. Создается нестационарный режим фильтрации, при котором происходит постоянное перераспределение давления в пласте. В работе получено аналитическое выражение для перетоков между высоко- и низкопроницаемыми пропластками при нестационарной периодической закачке в слоисто-неоднородном пласте в двумерной постановке. Исследовано влияние периода и амплитуды колебаний на нагнетательной скважине на среднюю скорость вертикальных перетоков между пропластками в двумерной постановке. Показано, что способ расстановки скважин несущественно влияет на интенсивность перетоков между слоями: при различных схемах расстановки скважин изменение интенсивности перетоков составляет до 15%.

SUMMARY. Cyclic impact on oil reservoir has been investigated since the middle of the 60s. At water injection, the pressure in high-permeable zones is restored quicker than in low-permeable ones; therefore, there are pressure differences between these zones causing fluid overflows. The non-stationary filtration mode at which there is a regular redistribution of pressure in a reservoir is caused. An analytical 2D solution for the fluid exchange between high-permeable and low-permeable reservoirs is obtained in this paper. The period and amplitude influence in an injection well on an average speed of vertical flows between the reservoirs is studied. The calculation results show that the method of well arrangement has insignificant impact on flow rate: the flow may change by 15% at different well arrangement.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Слоисто-неоднородный пласт, фильтрация, нефтяной пласт.

KEY WORDS. Layered reservoir, filtration, oil reservoir.

В работе рассмотрена модель плоскорадиальной фильтрации реагента в слоисто-неоднородном пласте, насыщенной однофазной вязкой ньютоновской жидкостью. Слоисто-неоднородный пласт состоит из высокопроницаемого и низкопроницаемого слоя, с перетоками пластовой жидкости между ними [1], [2]. Исследовалось влияние периодического изменения дебита либо давления на скважине на перетоки в каждой точке рассматриваемой области. Ранее были проведены различные исследования нестационарного (циклического) заводнения, аналитические модели двухслойного пласта в плоском одномерном случае были представлены и проанализированы в [3], [4]. В этих работах рассматривается также изменение водонасыщенностей в пропластках при перетоках жидкости между ними.

Обозначим h_1, k_1 и h_2, k_2 соответственно толщины и проницаемости высокопроницаемого и низкопроницаемого пропластков, p_i — давление жидкости в i -м слое, S_i — водонасыщенность i -го слоя, f_{bi}, f_{hi} — фазовые проницаемости слоев, β_b, β_n — коэффициенты сжимаемости для воды и нефти, q_b, q_n — удельные межслойные перетоки воды и нефти.

Таким образом, система уравнений, описывающая фильтрацию воды и нефти в двухслойном пласте, имеет вид [3]:

$$\begin{aligned} h_i \left(S_i m_i \beta_b \frac{\partial p_i}{\partial t} + m_i \frac{\partial S_i}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{v}_{bi} \right) &= (-1)^i q_b, \\ h_i \left((1 - S_i) m_i \beta_n \frac{\partial p_i}{\partial t} - m_i \frac{\partial S_i}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{v}_{hi} \right) &= (-1)^i q_n, \\ \vec{v}_{bi} &= - \frac{k_i f_{bi}(S_i)}{\mu_b} \operatorname{grad} p_i, \quad \vec{v}_{hi} = - \frac{k_i f_{hi}(S_i)}{\mu_n} \operatorname{grad} p_i. \end{aligned} \quad (1)$$

Для получения аналитического решения системы уравнений (1) примем следующие допущения [3], [4]: между высоко- и низкопроницаемым пропластками есть гидродинамическая связь; давление между слоями выравнивается мгновенно ($p_1 = p_2 = p$); пористости высоко- и низкопроницаемого пропластков равны ($m_1 = m_2 = m$); плотности, вязкости и сжимаемости воды и нефти равны между собой ($\rho_b = \rho_n, \mu_b = \mu_n, \beta_b = \beta_n$); зависимость фазовых проницаемостей $f_{bi} = f_b, f_{hi} = f_n$ от водонасыщенностей S_i является линейной.

При указанных допущениях система уравнений (1) может быть преобразована к следующему уравнению относительно давления:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \kappa \Delta p, \quad \kappa = \frac{k_1 h_1 + k_2 h_2}{h_1 + h_2} \frac{1}{m \mu \beta} \quad (2)$$

Тогда величина суммарных межслойных перетоков воды и нефти $q = q_b + q_n$ выражается через давление следующим образом:

$$q = m \beta \frac{(k_1 - k_2) h_1 h_2}{k_1 h_1 + k_2 h_2} \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (3)$$

Введем на плоскости полярную систему координат (r, φ) , граница пласта — окружность радиуса R , расстояние от скважины до центра окружности равно r_* (рис. 1). На границе пласта давление считаем равным нулю.

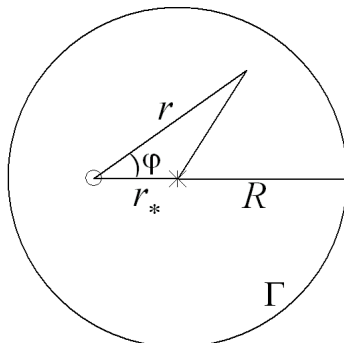


Рис. 1. Схематическое изображение области моделирования

При периодических изменениях давления либо дебита на скважинах происходят периодические колебания во всем пласте. Поэтому решение будем искать в виде суммы стационарного p_{st} и нестационарного решений p' : $p = p_{st} + p'$. Считаем, что p' гармонически зависит от времени:

$$p' = p_* C (A(r, \varphi) \cos \omega t + B(r, \varphi) \sin \omega t). \quad (4)$$

Рассмотрим следующие условия на границе пласта и на скважине:

$$1) \quad p'|_{\Gamma} = 0$$

$$2 \text{ а) } p_w'| = p_w C \sin \omega t \text{ или } 2 \text{ б) } \left. \frac{\partial p'}{\partial r} \right|_{r=r_w} = -\frac{Q_w \mu}{kh 2\pi r_w} C \sin \omega t. \quad (5)$$

Здесь p_w , Q_w — стационарные значения давления и расхода на скважине, C — безразмерная амплитуда колебаний, p_* — характерное давление.

Тогда общее решение системы уравнений имеет вид:

$$A(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} [A_n^0 \text{ber}_n(\alpha r) + A_n^1 \text{bei}_n(\alpha r) + A_n^2 \text{ker}_n(\alpha r) + A_n^3 \text{kei}_n(\alpha r)] \cos n\varphi, \quad (6)$$

$$B(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} [A_n^1 \text{ber}_n(\alpha r) - A_n^0 \text{bei}_n(\alpha r) + A_n^3 \text{ker}_n(\alpha r) - A_n^2 \text{kei}_n(\alpha r)] \cos n\varphi,$$

где ber_n , bei_n , ker_n , kei_n — функции Кельвина [5], $A_n^0, A_n^1, A_n^2, A_n^3$ — произ-

вольные постоянные, $\alpha = \sqrt{\frac{\omega}{\kappa}}$,

с граничными условиями:

$$1) \quad A, B|_{\Gamma} = 0,$$

$$2 \text{ а) } A|_{r=r_w} = 0, \quad B|_{r=r_w} = 1 \text{ или } 2 \text{ б) } A'_{\alpha r}|_{r=r_w} = 0, \quad B'_{\alpha r}|_{r=r_w} = 1. \quad (7)$$

Численное решение системы уравнений ищется в виде частичной суммы ряда (суммирование от 0 до $N-1$), с коэффициентами $A_n^0, A_n^1, A_n^2, A_n^3$, выбранными с учетом условий на границе рассматриваемой области.

Отметим, что в практически важных случаях можно пренебречь размерами скважины по сравнению с размерами пласта и считать скважину точечным источником (стоком), интенсивность которого определяется величинами давления или дебита на скважине. Тогда, в соответствии с принципом суперпозиции, можно рассчитать поле перетоков между пропластками при наличии в пласте нескольких скважин, каждая из которых работает в периодическом режиме со своей амплитудой и частотой.

Для круговой области в центре с одной скважиной была рассчитана интенсивность обмена жидкостью между низко- и высокопроницаемым пропластками. На рис. 2 и 3 представлена интенсивность обмена жидкостью между низко- и высокопроницаемым пропластками при различных значениях амплитуды давления (бар) на скважине (рис. 2) и при различных значениях периода колебаний (сут) на скважине (рис. 3) в зависимости от расстояния от скважины.

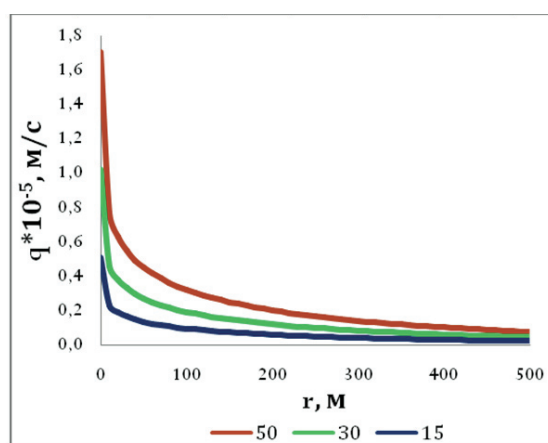


Рис. 2. Интенсивность обмена жидкостью между низко- и высокопроницаемым пропластками при различных значениях давления (бар) на скважине

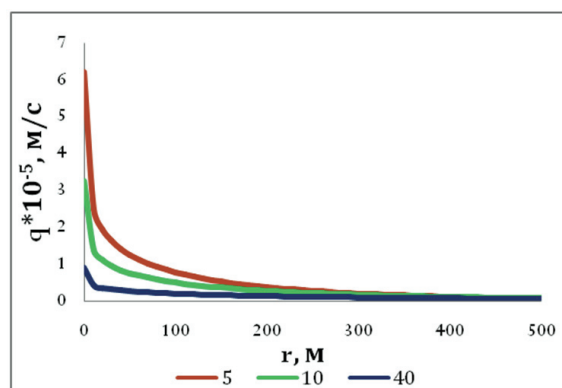


Рис. 3. Интенсивность обмена жидкостью между низко- и высокопроницаемым пропластками при различных значениях периода колебаний (сут) на скважине

Видно, что интенсивность перетоков возрастает при увеличении давления и при уменьшении периода колебаний на нагнетательной скважине.

На рис. 4 показана интенсивность обмена жидкостью между низко- и высокопроницаемым пропластками, рассчитанная для области с пятью нагнетательными скважинами. Технологические параметры скважин указаны в табл. 1.

Таблица 1

Технологические параметры скважин

х, м	у, м	Р _ж , бар	период, сут	Амплитуда С
3000	2000	15	5	1
1500	2400	50	40	1
1500	1600	30	20	1
2000	1000	15	5	1
1000	2400	50	40	1

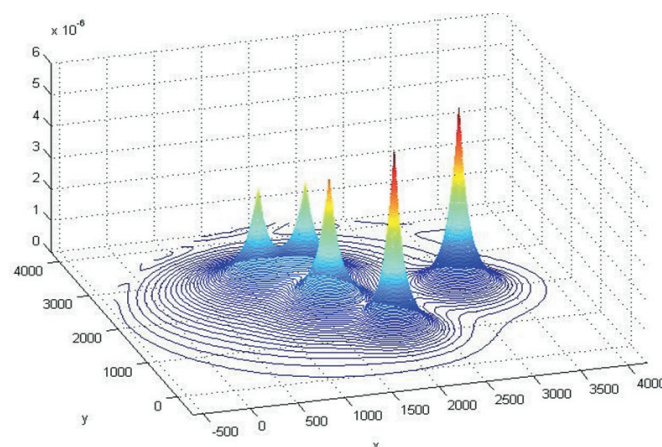


Рис. 4. Интенсивность обмена жидкостью между низко- и высокопроницаемым пропластками

Для четырех схем расстановки скважин: 5-точечной, 7-точечной, 2-рядной и 3-рядной (рис. 5), рассчитана интенсивность обмена жидкостью между низко- и высокопроницаемым пропластками. В каждом случае рассматриваемый участок содержал 6 нагнетательных скважин, при этом наименьшее расстояние между скважинами составляло 200 м. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

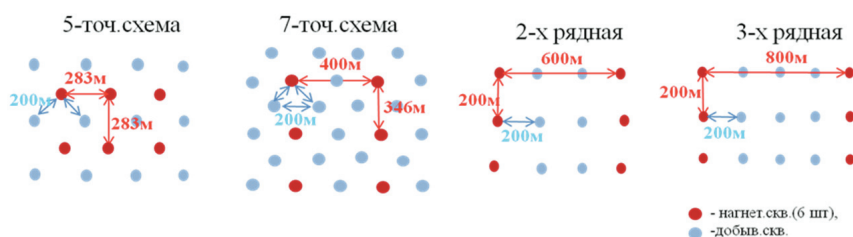


Рис. 5. Схемы расстановки скважин (наименьшее расстояние между скважинами равно 200 м)

Таблица 2

Интенсивность обмена жидкостью между низко- и высокопроницаемым пропластками при разных схемах расстановки скважин

Схемы расстановки скважин	Интенсивность обмена жидкостью, м/с
5-точечная	$1,19 \cdot 10^{-6}$
7-точечная	$1,15 \cdot 10^{-6}$
2-рядная	$1,05 \cdot 10^{-6}$
3-рядная	$1,03 \cdot 10^{-6}$

Видно, что в зависимости от схемы расстановки скважин интенсивность перетоков может изменяться в 1,15 раза.

Таким образом, в результате выполненного исследования получено решение, определяющее интенсивность обмена жидкостью между пропластками в каждой точке рассматриваемой области. Показано, что при различных схемах расстановки скважин изменение интенсивности перетоков жидкости между высоко- и низкопроницаемым пропластками составляет не более 15%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1985. 308 с.
2. Цинкова О.Э., Мясникова Н.А. Нестационарное гидродинамическое воздействие на нефтяные пласты // Особенности разработки сложнопостроенных залежей нефти: Сб. науч. трудов. Вып. 94. М.: ВНИИ, 1986. С. 53-64.
3. Шарбатова И.Н., Сургучев М.Л. Циклическое воздействие на неоднородные пласты. М.: Недра, 1988. 121 с.
4. Горбунов А.Т., Мыхтарянц С.А., Сафронов В.И., Сургучев М.Л., Цинкова О.Э., Шарбатова И.Н. Циклическое заводнение нефтяных пластов. М.: ВНИИОЭНГ, 1977. 65 с.
5. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 832 с.

REFERENCES

1. Surguchev, M.L. *Vtorichnye i tretichnye metody uvelicheniia nefteotdachi plastov* [Secondary and tertiary methods of increase in oil recovery of reservoirs]. Moscow: Nedra, 1985. 308 p. (in Russian).
2. Tsinkova, O.E., Miasnikova, N.A. Non-stationary hydrodynamic impact on oil reservoirs. *Osobennosti razrabotki slozhnopostroennykh zalezhei nefi: Sb. nauch. trudov. Vyp. 94* [Features of development of complicated structure of oil deposits. Issue 94]. Moscow, 1986. Pp. 53-64. (in Russian).
3. Sharbatova, I.N., Surguchev, M.L. *Tsiklichesкое vozdeistvie na neodnorodnye plasty* [Cyclic impact on heterogeneous stratum]. Moscow: Nedra, 1988. (in Russian).
4. Gorbunov, A.T., Mykhtariants, S.A., Safronov, V.I., Surguchev, M.L., Tsinkova, O.E., Sharbatova, I.N. *Tsiklichesкое zavodnenie nefiannykh plastov* [Cyclic flooding of oil reservoirs]. Moscow, 1977. 65 p. (in Russian).
5. Abramovits, M., Stigan, I. *Spravochnik po spetsial'nyim funktsiiam* [Reference book on special functions]. Moscow: Nauka, 1979. 832 p. (in Russian).

Авторы публикации

Болдырева Ольга Юрьевна — старший научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Тюменский филиал), кандидат физико-математических наук

Соколюк Любовь Николаевна — старший научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Тюменский филиал), кандидат физико-математических наук

Филимонова Людмила Николаевна — младший научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Тюменский филиал), магистрант Тюменского государственного университета

Authors of the publication

Olga Yu. Boldyreva — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics (Tyumen Branch), Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Lyubov N. Sokolyuk — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Research Associate, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics (Tyumen Branch), Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Lyudmila N. Filimonova — Junior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics (Tyumen Branch), Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Post-graduate student, Tyumen State University